

Czesław SAJDAK, Romuald KADZIMIERZ
Katedra Podstaw Procesów Metalurgicznych
Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej
Politechnika Śląska

PROGRAM OPNISzCz WSPOMAGAJĄCY PROJEKTOWANIE NAGRZEWNIC INDUKCYJNYCH DO SKROŚNEGO NAGRZEWANIA WSADÓW CYLINDRYCZNYCH

Streszczenie. W pracy opisano konstrukcję i podstawowe funkcje programu komputerowego OPNISzCz. Program ułatwia wyznaczenie parametrów elektrycznych, cieplnych i eksploatacyjnych nagrzewnic oraz obliczenia układów chłodzenia, kompensacji mocy biernej i symetryzacji obciążenia. Przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń nagrzewnicy do wsadów stalowych.

Summary. The paper describes the construction and the basic functions of OPNISzCz computer program. This program facilitates the determination of electric, heating and exploitation parameters of the heaters. It also makes the calculation of the cooling system, the compensation of passive power and symmetrization easier. The results of the exemplary calculations of the heater for steel charges have been presented.

Резюме. В работе описана конструкция и основные функции компьютерной программы ОПНИСч. Программа облегчает расчеты электрических, тепловых и эксплуатационных параметров нагревателей а также расчеты системы охлаждения, компенсации реактивной мощности и симметрирования нагрузки. Представлены результаты примерных расчетов нагревателя для стальных заготовок.

1. WSTĘP

Przy projektowaniu i konstruowaniu pieców i nagrzewnic indukcyjnych znaczny jest udział prac obliczeniowych przy wyznaczaniu parametrów eksploatacyjnych, elektrycznych i cieplnych tych urządzeń. Osiągnięcie założeń technologicznych procesu grzejjego (rodzaj nagrzewania, wydajność, temperatura itp.) oraz minimalizacja kosztów budowy i eksploatacji wymaga-

ja zwykle analizy wielowariantowej, wielokrotnego powtarzania złożonych i czasochłonnych obliczeń. Korzysta się przy tym z licznych współczynników, tablic, katalogów firmowych, danych materiałowych i zależności empirycznych.

Użycie przy projektowaniu mikrokomputerów z odpowiednim oprogramowaniem zdecydowanie usprawnia i przyspiesza obliczenia. Jedne z pierwszych w kraju programów użytkowych wspomagających projektowanie pieców indukcyjnych tyglowych i kanałowych oraz nagrzewnic indukcyjnych opracowano w Zakładzie Elektrotermii Hutniczej Politechniki Śląskiej. Programy te powstały przy współpracy z Przedsiębiorstwem Projektowania i Wyposażania Odlewni "Prodlew", w którym są stosowane głównie przy projektowaniu pieców tyglowych sieciowej i podwyższonej częstotliwości do topienia żeliwa oraz pieców kanałowych do podgrzewania i przetrzymywania ciekłego żeliwa. Konstrukcję, funkcje i własności programów OPPIT (obliczenia parametrów pieców indukcyjnych tyglowych), OPPIK (obliczenia parametrów pieców indukcyjnych kanałowych) i OPNISC (obliczenia parametrów nagrzewnic indukcyjnych skośnych) przedstawiono w pracach [1-4]. Zawierają one bloki obliczeń elektrycznych, cieplnych, układy chłodzenia wodnego, układów kompensacji mocy biernej i symetryzacji obciążenia oraz bloki danych. W przypadkach konieczności podejmowania decyzji (np. wybór materiałów, wymiarów układu grzejnego, częstotliwości prądu zasilającego itp.) projektant wspomagany jest niezbędnymi informacjami i zaleceniami.

2. KONSTRUKCJA I FUNKCJE PROGRAMU

Program OPNISCz stanowi zmodyfikowaną i rozszerzoną wersję programu OPNISC [4]. Został napisany w języku GFA Basic na komputer ATARI 1040 ST, używany przez zleceniodawcę pracy (PPiWO "Prodlew"), w ramach której program powstał [5]. Przygotowano również wersję na komputer IBM PC. Tekst źródłowy ma objętość ponad 240 kB. Program zawiera ponad 110 procedur obliczeniowych, graficznych, informacyjnych, obsługi i testujących. Przepływ danych między nimi odbywa się za pomocą parametrów procedur i zmiennych globalnych, mających wartość w całym programie. Do najważniejszych należą procedury:

"Moc_średnia" - wyznaczenie średniej mocy wydzielonej we wsadzie, niezbędnej do osiągnięcia temperatury końcowej w wymaganym czasie,

- "Wym_ciepła" - obliczenia strat cieplnych,
- "Par_elektr" - wyznaczenie liczby zwojów wzbudnika, parametrów schematu zastępczego oraz podstawowych parametrów elektrycznych nagrzewnicy,
- "Kompensacja" - wyznaczenie pojemności i mocy baterii kompensujących moc bierną,
- "Chłodzenie" - obliczenia parametrów układu chłodzenia wodnego.

Uproszczony algorytm programu pokazano na rys.1. Działanie programu rozpoczyna wczytanie niezbędnych do obliczeń wartości liczbowych ("Tablice"), np. danych materiałowych, współczynników indukcyjności wzajemnej wsadu i wzbudnika, współczynników Nagaoki itp.

"Opis" zawiera podstawowe informacje o przeznaczeniu i obsłudze programu.

W "Założeniach wyjściowych" określa się wymiary, rodzaj (wsad pełny lub rurowy), materiał oraz temperaturę początkową i końcową wsadu. Dla wsadów aluminiowych, miedzianych, mosiężnych i stalowych stałe materiałowe są obliczane dla przyjętej temperatury końcowej, dla innych materiałów wprowadza się je z klawiatury. W przypadku stali ferromagnetycznych możliwości obliczeniowe programu ograniczone są do temperatury końcowej wsadu wyższej od temperatury przemiany magnetycznej.

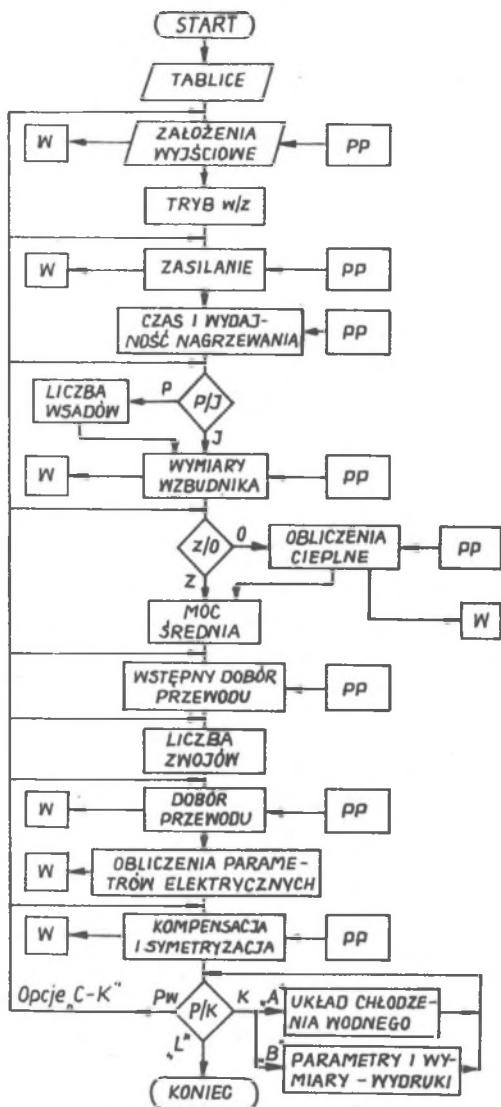
Obliczenia mogą być prowadzone w dwóch trybach:

- zadana wydajność (lub czas) nagrzewania (tryb "w"),
- zadane parametry źródła zasilania (moc, częstotliwość i napięcie) (tryb "z").

Po wyborze jednego z nich wprowadza się parametry zasilania (częstotliwość, napięcie, sprawność toru zasilającego i źródła). Można przy tym skorzystać z zaleceń dotyczących właściwej częstotliwości oraz danych znamionowych źródeł zasilania.

Decyzję o rodzaju nagrzewania - przelotowym (posuwowym) n wsadów (rys.2a) lub stacjonarnym (jednoczesnym) pojedynczego wsadu (rys.2b) - podejmuje się na podstawie porównania przyjętego czasu nagrzewania wsadu, z wymaganym, wynikającym z wydajności procesu technologicznego. Podstawą do przyjęcia czasu nagrzewania są wartości zalecane, wyznaczone z zależności przybliżonych [6,7].

Podpowiedzi ułatwiają również projektantowi wstępny wybór podstawowych wymiarów wzbudnika, grubości warstw ogniotrwałych i termoizolacyjnych, grubości szczeliny powietrznej i długości uzwojenia ("Wymiary wzbudnika").

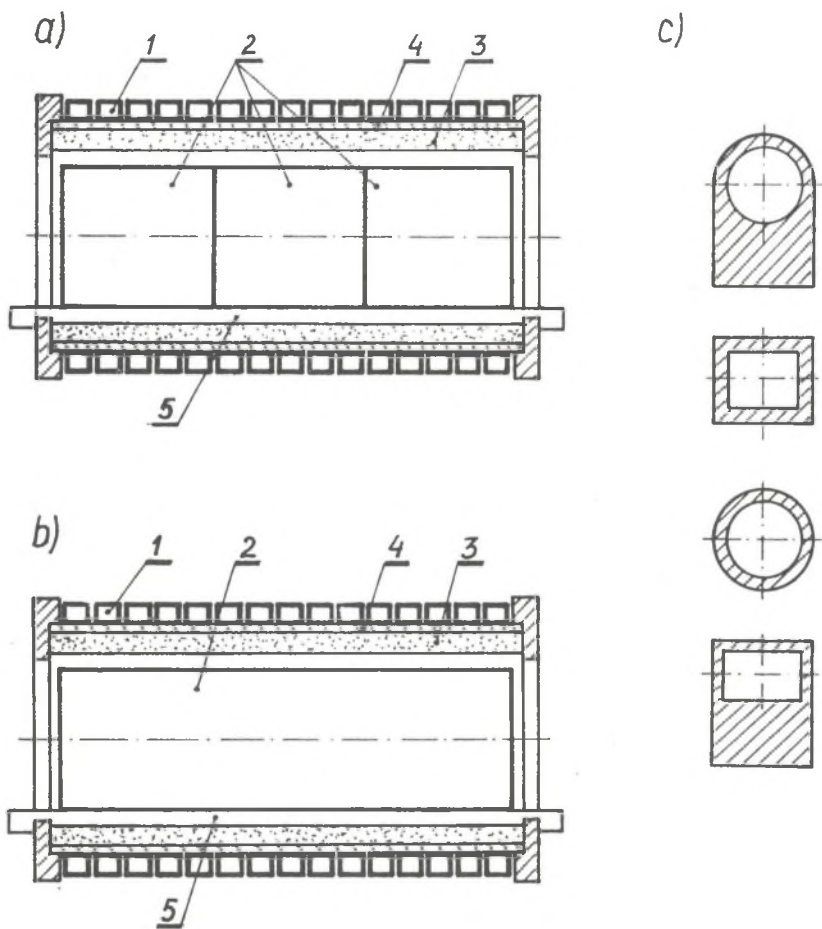


Rys.1. Uproszczony algorytm programu OPNISz

J - nagrzewanie jednoczesne, K - kontynuacja, O - obliczanie strat cieplnych, P - nagrzewanie przelotowe, PP - podpowiedz, Pw - powrót, W - wydruk, Z - zakładanie strat cieplnych

Fig.1. The simplified algorithm of OPNISz program

J - simultaneous heating, K - continuation, O - calculating the heat losses, P - constance heating, PP - suggestion, Pw - return, W - print out, Z - assuming the heat losses



Rys.2. Nagrzewnica indukcyjna przelotowa (a) i stacjonarna (b) oraz przekroje poprzeczne przewodów nawojowych (c)
 1 - uzwojenie wzbudnika, 2 - wsad, 3 - materiał ogniotrwały, 4 - materiał termoizolacyjny, 5 - prowadnica wsadu
 Fig.2. Constance induction heater (a) and stationary induction heater (and cross section of the wind wires (c)
 1 - inductor winding, 2 - charge, 3 - refractory material, 4 - heat-insulating, 5 - charge guide

Straty ciepłe układu wzbudnik - wsad ("Straty ciepłe") mogą być zakładane (tryb "Z") lub obliczane (tryb "O"). W drugim przypadku straty wyznaczone są dla przyjętej temperatury średniej uzwojenia wzbudnika oraz znanej temperatury końcowej i emisyjności wsadu. Wyłożenie ogniotrwałe może być uwarstwione (do 4 warstw), o zróżnicowanych grubościach i przewodnościach cieplnych. Rodzaj materiału jest wybierany na podstawie informacji wyświetlanych na ekranie monitora. Wynikiem obliczeń są nie tylko straty i sprawność cieplna, lecz również temperatury średnie i rozkład temperatur w warstwach wyłożenia.

Parametry elektryczne nagrzewnicy wyznaczone są w trzech etapach:

- w pierwszym, na podstawie obliczeń parametrów elektrycznego schematu zastępczego układu wzbudnik - wsad, przyjmuje się liczbę zwojów uzwojenia wzbudnika,
- w drugim, po wyborze jednego z czterech rodzajów przewodu profilowego (rys.2c) i jego wymiarów, obliczane są podstawowe wielkości elektryczne charakteryzujące nagrzewnicę, m.in. rezystancja, reaktancja i impedancja zastępcza, natężenie prądu, współczynnik mocy, moc, sprawność (p.3, tab.4). Dobór przewodu ułatwiają informacje o produkowanym w kraju asortymencie miedzianych przewodów nawojowych i ich wymiarach.
- w trzecim, po wprowadzeniu danych znamionowych kondensatorów, wyznacza się pojemność i moc baterii kondensatorów oraz parametry eksploatacyjne nagrzewnicy po kompensacji mocy biernej ("Kompensacja i symetryzacja"). W przypadku nagrzewnic zasilanych prądem o częstotliwości sieciowej oblicza się ponadto indukcyjność dławika i pojemność baterii kondensatorów układu symetryzującego. Dobór kondensatorów ułatwia zestawienie ich danych znamionowych.

Obliczanie liczby zwojów wzbudnika, parametrów schematu zastępczego oraz parametrów elektrycznych nagrzewnicy prowadzi się równoległe trzema metodami: transformatora powietrznego, oporów wniesionych i oporów magnetycznych [6-8], w stanie "gorącym", tzn. dla temperatury końcowej wsadu. Na podstawie analizy wyników obliczeń dla kilkudziesięciu wariantów wymiarów układu wzbudnik - wsad i warunków zasilania oraz porównania wyników obliczeniowych i doświadczalnych dla kilku rozwiązań konstrukcyjnych nagrzewnic stwierdzono, że największą dokładność obliczeń uzyskuje się metodami transformatora powietrznego i oporów magnetycznych i te właśnie metody zaleca się stosować.

Po zakończeniu obliczeń wielkości elektrycznych uzyskuje się dostęp do menu głównego programu, zawierającego następujące opcje:

- A. Układ chłodzenia
- B. Wydruki
- C. Parametry wyjściowe
- D. Parametry zasilania
- E. Wymiary wzbudnika
- F. Obliczenia ciepłe
- G. Wstępny dobór przewodu
- H. Napięcie źródła i liczba zwojów
- I. Dobór przewodu
- J. Wyniki obliczeń elektrycznych
- K. Kompensacja i symetryzacja
- L. Koniec obliczeń

Opcje C - K umożliwiają powroty do bloków programowych w celu zmiany założeń, skorygowania wymiarów lub parametrów nagrzewnicy. Powroty te są również możliwe po każdym etapie wykonywania obliczeń.

Kontynuacją obliczeń jest wyznaczenie parametrów układu chłodzenia wodnego (opcja A), przy znanej wydajności pompy wodnej lub nieznanym natężeniu przepływu wody chłodzącej ("Układ chłodzenia wodnego").

Opcja B obejmuje następujące wydruki parametrów nagrzewnicy i wymiarów układu grzejjego:

- A. Parametry elektryczne i eksploatacyjne
- B. Parametry eksploatacyjne nagrzewnicy po kompensacji
- C. Wymiary wzbudnika
- D. Wyniki obliczeń układu chłodzenia
- E. Bilans mocy
- F. Wartości współczynników w metodach obliczeniowych

3. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

W tabl. 1 - 7 przedstawiono niektóre wyniki obliczeń parametrów nagrzewnicy indukcyjnej przeznaczonej do nagrzewania wsadów stalowych o średnicy 150 mm i długości 600 mm. Temperatura końcowa - 1200^oC, czas nagrzewania ok. 940 s.

Tablica 1

WARIANT NISc - St/1000	
ZAŁOŻENIA WYJŚCIOWE	
Rodzaj i parametry wsadu	
Walcowy pełny	
Stal	
Temperatura początkowa	$T_p [^{\circ}\text{C}] = 20.0$
Temperatura końcowa	$T_k [^{\circ}\text{C}] = 1200.0$
Konduktywność	$[\text{MS/m}] = 0.8$
Entalpia własc. ($T_p - T_k$)	$[\text{kWh/t}] = 212.4$
Gęstość	$[\text{kg/m}^3] = 7800.0$
Wymiary wsadu	
Długość	$[\text{m}] = 0.6000$
Średnica	$[\text{m}] = 0.1500$

Tablica 2

WARIANT NISc - St/1000	
ZASILANIE	
Częstotliwość	$[\text{Hz}] = 1000.000$
Napięcie źródła	$[\text{V}] = 450.000$
Spadek napięcia w torze	$[\%] = 5.000$
Sprawność toru zasilaj.	$[\%] = 95.000$
CZAS I RODZAJ NAGRZEWANIA	
Czas wydawania wsadu	$[\text{s}] = 940.000$
Wydażność	$[\text{szt/h}] = 3.830$
Nagrzewanie: jednoczesne	

Tablica 3

WARIANT NISc - St/1000	
WYMIARY WZBUDNIKA	
Grubość jednostronna [m]:	
Szczeliny powietrznej	= 0.0100
Warstwy ogniotrwalej	= 0.0250
Warstwy termoizolacyjnej	= 0.0050
Izolacji elektrycznej	= 0.0030
Odległość wsad-wzbudnik [m]=	0.0430
Średnica wewnętrzna [m]=	0.2360
Długość wsadu [m]=	0.6000
Długość wzbudnika [m]=	0.7493

Tablica 4

WARIANT NISc - St/1000		METODA			
WYNIKI OBLICZEŃ ELEKTRYCZNYCH		Tr. pow.	Opor. wn.	Opor. mag.	Wart. śr.
Liczba zwojów wzb.	[-]	33.000	33.000	33.000	33.000
Rezystancja	$\cdot 10^{-3}$ [Ω]	45.167	51.090	42.345	46.200
Reaktancja	$\cdot 10^{-3}$ [Ω]	331.560	310.724	320.302	320.862
Impedancja	$\cdot 10^{-3}$ [Ω]	334.622	314.896	323.089	324.171
Prąd wzbudnika	[A]	1277.561	1357.592	1323.163	1318.748
Gęstość prądu	[A/mm ²]	28.659	30.455	29.682	29.583
Napięcie wzbudnika	[V]	427.500	427.500	427.500	427.500
Współczynnik mocy	[-]	0.135	0.162	0.131	0.143
Moc użyteczna	[kW]	66.110	93.308	67.000	75.023
Moc czynna wzbudn.	[kW]	94.917	122.778	95.576	103.976
Moc bierna	[kvar]	541.159	572.681	560.773	558.010
Wydajn. nagrzew.	[t/h]	0.311	0.439	0.315	0.353
Wydajn. nagrzew.	[szt/h]	3.746	5.312	3.814	4.271
Sprawność elektr.	[%]	81.865	85.440	82.232	83.304

Tablica 5

WARIANT NISc - St/1000	
PARAMETRY ELEKTRYCZNE I EKSPLOATACYJNE	
Rodzaj metalu: Stal	
Masa wsadu	[t]= 0.0827
Temperatura początkowa [°C]=	20.0
Temperatura końcowa [°C]=	1200.0
Częstotliwość	[Hz]= 1000.0
Napięcie zasilania	[V]= 450.0
Napięcie wzbudnika	[V]= 427.5
Moc czynna:	
- pobierana z sieci	[kW]= 108.3
- pobierana ze źródła	[kW]= 102.9
- doprow.do wzbudnika	[kW]= 94.7
Współczynnik mocy:	
- przed kompensacją	[-]= 0.1311
- po kompensacji	[-]= 0.9927
Prąd wzb.(nieskompens.)	[A]= 1323.2
Prąd źródła po kompens.	[A]= 230.4
Sprawność układu wzbudnik - wsad :	
- elektryczna	[%]= 82.2
- cieplna	[%]= 85.2
- całkowita	[%]= 70.1
Sprawn. całk.urządzenia	[%]= 61.8
Wydajn. nagrzewania	[t/h]= 0.3154
Wydajn. nagrzewania	[szt/h]= 3.8
Czas nagrzewania	[s]= 943.8
Zuż.en.elektryczn.	[kWh/t]= 343.4
Zuż.en.elektryczn.	[kWh/szt]= 28.4

(obliczenia - metoda oporów magnetycznych)

Tablica 6

WARIANT NISc - St/1000	
PARAMETRY EKSPLOATACYJNE PO KOMPENSACJI	
Współcz. mocy po kompens. [-]	= 0.9927
Moc P pobierana z sieci [kW]	= 108.3
Moc P pobier.ze źródła [kW]	= 102.9
Moc P dopr. do nagrzew. [kW]	= 98.7
Moc Q dopr. do nagrzew. [kvar]	= 12.5
Moc S dopr. do nagrzew. [kVA]	= 98.6
Nap.na zacisk.wzbudnika [V]	= 427.5
Prąd pobierany ze źródła [A]	= 230.4
Prąd bat. kondensatorów [A]	= 1282.5
Prąd wzbudnika [A]	= 1323.2
Moc Q baterii kondens. [kvar]	= 548.3
Moc Qzn bat. kondens. [Mvar]	= 0.8
Liczba kondens.w baterii [-]	= 15.0

(obliczenia metodą oporów magnetycznych)

Tablica 7

WARIANT NISc - St/1000	
BILANS MOCY	
MOC UŻYTECZNA [Kw]	= 67.00
	STRATY MOCY:
	- cieplne [kW]= 11.59
Moc we wsadzie [kW]	= 78.59
	- w uzwojeniu [kW]= 16.98
Moc do wzbudnika [kW]	= 95.58
	- w kondensat. [kW]= 2.19
	- w torze zasil.[kW]= 5.15
	- w źródle zas. [kW]= 5.42
MOC POB. Z SIECI [kW]	= 108.33

(obliczenia metodą oporów magnetycznych)

4. PODSUMOWANIE

Program OPNIScz w zasadniczy sposób usprawnia prace obliczeniowe przy projektowaniu nagrzewnic indukcyjnych do skrośnego nagrzewania wsadów. Do jego podstawowych zalet i własności należy:

- wygodne wprowadzanie i korygowanie danych, bardzo prosta obsługa, zabezpieczenia przed wprowadzaniem niewłaściwych danych,
- liczne komunikaty i podpowiedzi ułatwiające obsługę programu oraz podejmowanie decyzji,
- możliwość wielokrotnego powtarzania fragmentów obliczeń przy modyfikacjach danych wyjściowych,
- możliwość obliczania parametrów elektrycznych nagrzewnicy różnymi metodami.

Budowa modułowa programu pozwala poszerzyć jego funkcje, m.in. o obliczenia parametrów wzbudników wielowarstwowych, wielosekcyjnych, do nagrzewania szybkiego itp.

LITERATURA

- [1] Sajdak Cz. i inni: Wspomaganie komputerowe projektowania pieców indukcyjnych tyglowych. Materiały III Konferencji "Badania naukowe w elektrotermii", Wisła 1988, s.28-39.
- [2] Sajdak Cz. i inni: Program OPPIK - obliczanie parametrów pieców indukcyjnych kanałowych do podgrzewania ciekłych metali. Materiały IV Konferencji "Badania naukowe w elektrotermii", Wisła 1989, s.19-29.
- [3] Sajdak Cz. i inni: Wspomaganie komputerowe projektowania pieców i nagrzewnic indukcyjnych. ZN Pol.Śl., seria Hutnictwo nr 36, Gliwice 1992.
- [4] Sajdak Cz. i inni: Wspomaganie komputerowe projektowania nagrzewnic indukcyjnych skrośnych do wsadów cylindrycznych i prostokątnych. Materiały IV Konferencji "Badania naukowe w elektrotermii", Wisła 1989, s.30-35.
- [5] Kadzimirz R. i inni: Opracowanie programu do wyznaczania parametrów nagrzewnic indukcyjnych do wsadów prostokątnych i cylindrycznych pełnych i rurowych z metali nieżelaznych i stali do nagrzewania stacjonarnego i przelotowego. Praca NB-192/RMI/88 Instytut Metalurgii, Katowice 1989.

- [6] Liwiński W.: Nagrzewnice indukcyjne skrośne. WNT, Warszawa 1968.
- [7] Sajdak Cz., Samek E.: Nagrzewanie indukcyjne. Podstawy teoretyczne i zastosowanie. Wyd. Śląsk, Katowice 1987.
- [8] Słuchockij A.E., Ryskin S.E.: Induktory dla indukcyjnego nagiewa. Energijska, Leningrad 1974.

OPNISz PROGRAM AIDING THE DESIGN OF TROUGH INDUCTION HEATERS FOR THE CYLINDRICAL CHARGES

Abstract

Calculation works have an important part in induction heaters design especially when determining the exploitation, electric and heat parameters. The achievement of technical assumptions of the heating process and the costs minimalization usually require multialternative analysis. It is also necessary to use numerous tables, characteristics, empirical dependences etc.

The use of microcomputers with a proper software significantly shortens the time of calculations. One of the first microcomputers programs in Poland prepared for calculation of induction heaters parameters in the process of cylindrical charges through heating have been presented in the paper. The program was prepared in two versions for microcomputers: Atari 1040 ST (in GFA Basic) and IBM PC (in Pascal). The program includes over 110 calculation, graphic, informal and testing procedures.

The simplified algorithm of the program is shown in fig.1. The calculations can be lead in two ways:

- known productivity or heating time,
- known supply source parameters.

The program makes it possible to calculate the parameters of constant induction heaters (fig.2a) and stationary induction heaters (fig.2b). It is possible to choose one of the three calculation methods. While taking a decision the designer is helped by suggestions displayed on the screen for example when choosing the conductor (fig.2c), refractory materials, inductor dimensions etc. The program includes procedures of electric and heat calculations and makes it possible to design water cooling, reactive power compensation and symmetrization systems. When the main part of the calculations is completed ("ELECTRIC PARAMETERS CALCULATIONS") it is possible to come back to the program menu. The options C-K make it

possible to change the assumptions or correct the parameters and dimensions of the heater. The option A makes it possible to determine water cooling systems parameters. The option B makes it possible to print-out the calculation results.

The exemplary results of the induction heater calculations have been presented in tables 1-7. The device was used for heating cylindrical steel charges (diameter - 150 mm, length - 600 m, final temperature 1200°C heating time - 940 s). The OPNIScz program will be completed with some new functions for example calculations of multilayer or multisection inductors parameters.